

以雨量為基礎之土砂災害警戒系統成效評估—— 以台灣及日本為例

陳振宇*

摘 要 建立警戒系統，適時疏散民眾，已被公認是防災策略中，重要且有效的方式。國內外已有大量的文獻研究如何建立以雨量為指標的土砂災害警戒模式，但對於完整的警戒系統（包含警戒模式及發布機制）實際應用時所面臨的問題及其成效評估方式，卻少有研究探討。本文以台灣及日本建立多年的土砂災害警戒系統為例，比較二者在警戒模式與發布機制之異同，並提出涵蓋率、命中率、誤報率及剩餘疏散時間等警戒發布成效之評估指標；此外，藉由歷年統計數據及災害實例指出現行模式對於災害可能發生之明確地點、類型及規模的掌握上尚有不足，同時提出未來可行的改進策略及研究方向。

關鍵詞：預警系統、土石流、崩塌、警戒成效評估、疏散。

Evaluation of Rainfall-Based Sediment Disaster Warning Systems: Case Studies in Taiwan and Japan

Chen-Yu Chen *

ABSTRACT Establishing warning systems and evacuating inhabitants are recognized as important approaches for disaster risk reduction. While the rainfall-based warning model of landslide or debris flow disasters has been extensively investigated, the problems of implementing the rainfall-based warning model during typhoons or heavy rainfall have received less attention. This study evaluated the warning systems for debris flows and slope failures in Taiwan and Japan. We discuss the characteristics of the warning models and warning issuing systems in Japan and Taiwan, and also suggest evaluation indexes of warning effectiveness: the warning hit rate, false alert rate, warning cover rate, and remaining time for evacuation. In addition, this study focuses on the lack of attention to current rainfall-based warning models during actual disaster cases and several years of statistical data. Finally, this research recommends future disaster prevention strategies and resolution.

Key Words : Rainfall-base warning system, debris flow, slope failure, evaluation, evacuation.

一、前 言

面對土砂災害的威脅，建立警戒系統，即時發布土砂災害警戒，疏散土砂災害潛勢區內的民眾，是降低人員傷亡最直接的方法。國內外已有許多研究嘗試使用不同類型的指標來建立具體可行的土砂災害警戒

系統。由於雨量係造成土砂災害的重要誘因，且實務上，雨量資料係較易即時取得的現地監測資訊，故以雨量為警戒指標的土砂災害警戒模式是各類型警戒系統中，最常使用的模式。由於自然環境的影響，日本及台灣每年颱風豪雨期間均飽受土砂災害的威脅，故早已建立以雨量為指標的土砂災害警戒系統，且有多

年的實務操作經驗，因此本研究選擇以日本及台灣現行實務操作之土砂災害警戒系統作為探討的案例。

雖然造成土砂災害之誘因包含地震及豪雨，但實務上目前日本及台灣均僅針對因颱風豪雨所造成的土砂災害發布警戒訊息。日本於颱風豪雨期間發布的土砂災害警戒訊息稱為「土砂災害警戒情報」，其範圍則包含崩塌 (Slope Failure) 及土石流 (Debris Flow)，但不包括地滑 (Landslide) (Osanaï et al., 2010)；台灣於颱風豪雨期間發布的土砂災害警戒訊息稱為「土石流警戒區預報」，其範圍僅針對土石流，不包含崩塌及地滑 (陳振宇, 2008)。為方便討論起見，本文統稱為土砂災害警戒。

土砂災害警戒模式可概分為直接法 (例如使用鋼索檢知器、地聲等，作為警戒指標)，以及間接法 (例如使用雨量、地下水位等)。雖然直接法具有準確性高之優點，但考量警戒模式之可操作性及疏散作業所需時間，現階段日本及台灣均以雨量作為警戒指標 (國土交通省河川局砂防部, 2005；農委會, 2010)。目前國內外已有許多研究嘗試發展以雨量為指標的土砂災害警戒模式，例如 Wiczorek and Glade (2005) 曾彙整世界各國所建立的土石流警戒之雨量指標模式。惟一個完整的土砂災害警戒系統應包含「警戒模式」及「發布機制」二部份，但現今大部份的研究多僅聚焦於警戒模式的建立，在未考量實務操作 (發布機制) 可能遇到的各種複雜情境及需求下，多數警戒模式實際應用於颱風豪雨期間之成效有限；且多數警戒模式之驗證僅依據警戒發布時間是否在災害發生之前作為成效評估之標準 (國土技術政策總合研究所, 2007)，並無法充份檢驗是否滿足地方政府在執行疏避難決策時實際的需求，例如夜間山區疏散不易，能否於入夜前提前發布警戒等。依據日本國土技術政策總合研究所 (2010) 統計日本 2008 年的資料，由於諸多原因，都道府縣雖已針對所轄市町村的許多地區發布土砂災害警戒，但負責執行疏散避難決策的市町村政府，對於已發布警戒區範圍內之危險區，真正進行疏散避難的比例只有 2.2%，而民眾接獲土砂災害警戒訊息後，採取自主性疏散避難的比例也只有 2.8%，如此偏低的數據顯示現行的警戒模式在實務上，可能並未獲得充份的信任與認同。

本研究以日本及台灣的土砂災害警戒系統為例，針對現行警戒模式及發布機制作完整的分析與探討，並藉由歷年統計數據及災害實例找出現行模式不足之

處，同時提出未來可行的改進策略及研究方向。為探討前述這些議題，本研究旨在回答下列問題：

1. 台日現行之土砂災害警戒系統之特性與差異為何？
2. 警戒成效評估應包含那些項目？
3. 影響警戒成效的因素有那些？
4. 現行警戒模式之不足處為何？
5. 未來可行的改進策略及研究方向？

二、材料及方法

1. 日本土砂災害警戒系統簡介

(1) 警戒模式

日本早自 1984 年即開始發展以雨量為指標的土砂災害警戒系統，並使用短期雨量指標 (Short-term Rainfall Index) 及長期雨量指標 (Long-term rainfall index) 劃設土砂災害警戒的臨界線 (Critical Line, CL)，其中在臨界線左下方為安全區，右上方為危險區。颱風豪雨期間，土砂災害警戒系統定時將實測雨量資料轉換為短期及長期雨量指標，並點繪於圖上形成一連續之蛇曲線 (Snake line)，如蛇曲線已超過或即將超過臨界線時，即發布土砂災害警戒 (國土技術政策總合研究所, 2001)，如圖 1。日本歷年短期及長期雨量指標的發展及演變，如表 1 (Osanaï et al., 2010)。由於傳統劃設臨界線的方式必須仰賴大

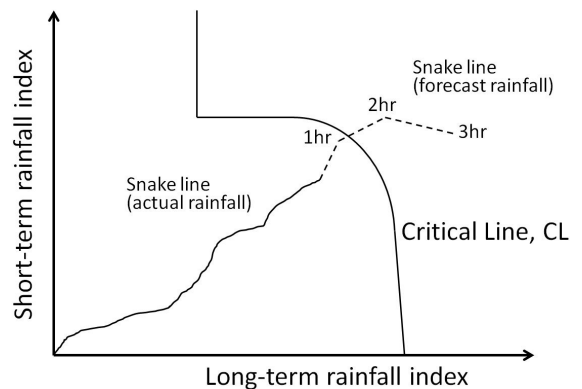


圖 1 日本土砂災害警戒模式示意圖

Fig.1 The basic concept used for issuing early-warning information in Japan

量已知發生時間的災例資料，再以人工方式決定臨界線的位置；但在實務上，大部分的地區很難蒐集到足夠的災例資料，且人工劃設臨界線的方式亦無客觀的標準，故日本政府自 2005 年起即開始於部份地區（例如鹿兒島縣等）試用以徑向基底函數網路 (Radial Basis Function Network, RBFN) 的方式，並將日本氣象廳自 1988 年起已建置完成的 5km 網格式雷達解析雨量資料 (Radar Automated Meteorological Data Acquisition System analytical rainfall, RAMEDas analytical rainfall)(目前精度已達 1km) 轉為 1 小時一筆之 60 分鐘累積雨量及土壤雨量指數作為輸入值，以類神經網路模式直接劃設出臨界線 (国土交通省砂防部等, 2005; Osanai et al., 2010)。由於此種方式具有毋需明確災例資料，即可客觀的定出臨界線的優點。故自 2008 年起，日本全國各都道府縣即已全面使用此種方式劃設土砂災害警戒臨界線，並據以發布土砂災害警戒 (Osanai et al., 2010)。

(2) 警戒發布機制

目前日本的土砂災害警戒係由都道府縣的砂防單位及地方氣象台共同發布，發布時間採不定時方式；亦即當預測未來 2 小時後，蛇曲線將超越臨界線時，即發布「土砂災害警戒情報」。發布樣式如圖 2 (国土交通省河川局砂防部、氣象庁予報部, 2005)，發布對象為該都道府縣所轄之市町村。其內容主要是以文字為主，說明警戒範圍包含那些市町村，同時提醒未來 1 至 3 小時最大可能降雨地區及強度等氣象資訊，並輔以簡單圖形說明。此外，各都道府縣的砂防單位亦以網站公開方式，將所轄地區以 5km 網格式呈現各地區的土砂災害危險度等級，以提供市町村

執行疏散避難決策人員及一般民眾參考，如圖 3 (Osanai et al., 2010)。

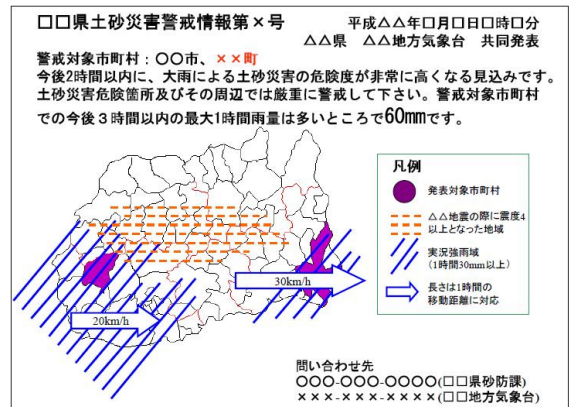


圖 2 日本土砂災害警戒情報範例 (MLIT et al., 2005)

Fig.2 The format in which early-warning information is disseminated from JMA

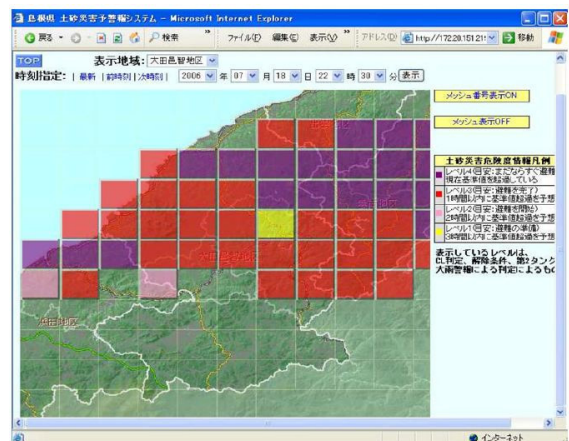


圖 3 日本都道府縣之土砂災害警戒系統範例 (Osanai et al., 2010)

Fig.3 The format in which early warning information is disseminated from local government

表 1 日本歷年短期・長期雨量指標的發展演變 (Osanai et al., 2010)

Table 1 Summary of rainfall indices and methods of setting the Critical Line used by MLIT in Japan

Year	Short-term rainfall index	Long-term rainfall index	Method of boundary fitting
1984	60-min accumulated rainfall	AP (half time: 24 h)	By eye
1984	Effective rainfall	AP (half time: 24 h)	By eye
1993	AP (half time: 1.5 h)	AP (half time: 72 h)	By eye
2005	60-min accumulated rainfall	Soil-water index	Radial Basis Function Network

註：AP (antecedent precipitation) 定義為 $AP = \sum \alpha_i R_i$ ，其中 i 小時前的折減係數 $\alpha = 0.5^{i/T}$ ， R_i 為 i 小時前的時雨量， T 為半衰期 (half time)

(3) 疏散避難決策機制

依據日本土砂災害防止法 (2001) 第 7 條，地區的疏散避難決策及發布係由市町村執行。決策時可參考都道府縣所發布的「土砂災害警戒情報」(如圖 3)、都道府縣砂防部門早期所訂定的「土砂災害警戒避難基準雨量」、各單位所設置之現地雨量計觀測的結果，以及現地是否已出現災害發生前兆等 (國土交通省砂防部，2007)。

2. 台灣土砂災害警戒系統簡介

(1) 警戒模式

台灣以雨量為指標的預警系統，自 1990 年歐菲莉颱風於花蓮縣秀林鄉銅門村造成重大土石流災害後即開始相關研究 (詹錢登，2000)，但政府單位正式建立全國性的土石流預警機制始自 2002 年起 (陳振宇，2008)。比較特別的是，由於台灣的災害防救法僅明列土石流災害，未含崩塌、地滑等其他坡地災害，故相關的預警機制目前僅針對土石流災害。早期台灣亦參考日本作法，使用短期及長期雨量指標定出每一個鄉鎮 (相當於日本的市町村) 的土石流災害的警戒臨界線，如蛇曲線超越臨界線時，即發布該鄉鎮為土石流警戒區 (陳振宇，2008)。

為滿足地方政府對於警戒區範圍細緻化之需求，以及發展社區及民眾自主雨量觀測與避難機制需要更簡單易懂的參考指標；自 2004 年 12 月起台灣改為以降雨驅動指標 (Rainfall Triggering Index, RTI) 模式，訂出各鄉鎮的土石流警戒基準值 (詹錢登、李明熹，2004)。其計算方式簡述如下：

$$RTI = I \times R_i$$

$$R_i = \sum_{i=0}^7 \alpha_i R_i$$

其中 I 為 60 分鐘累積雨量 (60-min accumulated rainfall)； R_i 稱為有效累積雨量 (Effective accumulated rainfall)， R_i 為前 i 日的 24 小時累積雨量 (例如 R_0 即為目前時間之前的 24 小時累積雨量)， α^i 為前 i 日的折減係數，其中 α 目前採用 0.8。

訂定各鄉鎮警戒指標時，先蒐集該鄉鎮內代表雨量站之歷年降雨資料，配合災例發生時間，

以人工方式訂出發生機率約為 70% 之 RTI 值 (如圖 4)，再將此值除以雨場平均降雨強度 10mm/hr，並取 50mm 為一個級距，即可訂出各鄉鎮之土石流警戒基準值 (R_c)。依據 2012 年 4 月公布的結果，目前台灣 159 個轄區內有土石流潛勢溪流的鄉鎮，其土石流警戒基準值之範圍為 200 至 600mm 共 9 個級距，例如高雄市那瑪夏區為 200mm、嘉義縣阿里山鄉為 250mm，花蓮縣玉里鎮為 600mm (水土保持局土石流防災資訊網，2012)。台灣歷年土石流警戒基準值使用範圍之沿革如表 2。

警戒分析採用中央氣象局每 10 分鐘定時更新的全台 524 個自動雨量站即時資料 (張保亮，2011)，並依集水區、村里界、自動雨量站及土石流潛勢溪流所在位置綜合考量，將每個鄉鎮區分為數個警戒區的範圍，並各有不同的主要參考雨量站及備用參考雨量站，如表 3。

(2) 警戒發布機制

台灣的土石流警戒目前係由水土保持局統一發布，發布時間為海上陸上颱風警報發布後每日 5、11、17、20、23 時定時發布，必要時則不定時加報；警戒等級分為「黃色警戒」及「紅色

表 2 台灣歷年土石流警戒基準值 (R_c) 使用沿革

Table 2 The critical accumulated rainfall (R_c) for debris flow in Taiwan

年度	2005	2006	2007~2008	2009	2010~2012
土石流警戒基準值 (mm)	200~350	200~450	250~550	250~600	200~600

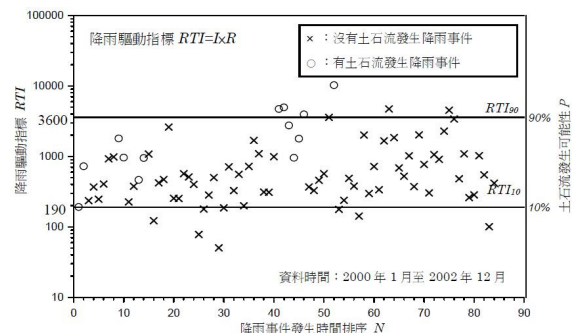


圖 4 以降雨驅動指標區分土石流發生可能性示意圖 (Jan and Li, 2004)

Fig.4 Classification of debris-flow occurrence probability based on rainfall triggering index

警戒」二級，發布流程如圖 5。發布之樣式如圖 6，內容主要提供目前已發布的土石流紅色及黃色警戒的範圍以及建議地方政府應進行之相關警戒作為，詳細內容係以表格呈現，並以傳真及網路公開方式發布。此外，前揭資訊亦已整合於 Google Maps 及 Google Earth，將全台所有土石流潛勢溪流之警戒等級以網路方式公開給地方政府及一般民眾參考（水土保持局，2011）。

(3) 疏散避難決策機制

依據台灣災害防救法（2000）第 24 條，地區的疏散避難決策及發布係由直轄市、縣（市）政

府、鄉（鎮、市、區）公所（以下合稱為地方政府）負責，但實際執行時，往往更仰賴身處現場的村里長。一般而言，地方政府執行疏散避難決策的資訊來源，主要來自中央政府提供的氣象、土石流及淹水警戒，並參考鄉鎮公所或村里長所傳回來的現地狀況（陳亮全等，2008）。

3. 土石災害警戒模式成效評估方式

由於土石災害警戒的成效會直接影響地方政府之疏散避難決策，良好的土石災害警戒系統不僅要能在災害發生前及時發布預警，也不能因為過於保守，頻

表 3 全台各地土石流警戒基準值及參考雨量站(範例)

Table 3 The list of critical rainfall values and reference precipitation station in Taiwan (sample)

縣市	鄉鎮	警戒區範圍		土石流警戒基準值 (mm)	參考雨量站	
		警戒區座落村里 (土石流潛勢溪流總數)	土石流潛勢溪流數 (條)		代表站1	代表站2
宜蘭縣	朝陽里 (4)		4	500	南澳	東澳
	蘇澳鎮 南建里 (1)、永春里 (2)、長安里 (1)、永樂里 (5)、蘇北里 (1)、聖湖里 (4)		14		蘇澳	冬山
	三星鄉 集慶村 (1)、拱照村 (3)、天山村 (1)		5		三星	寒溪
	寒溪村 (2)、復興村 (4)		6	550	古魯	寒溪
	崙埤村 (3)、松羅村 (4)		7		玉蘭	牛鬥
	大同鄉 四季村 (6)、南山村 (7)		13		南山	思源
	英士村 (2)、樂水村 (3)		5		牛鬥	太平山
	太平村 (2)、茂安村 (7)		9		南山	太平山

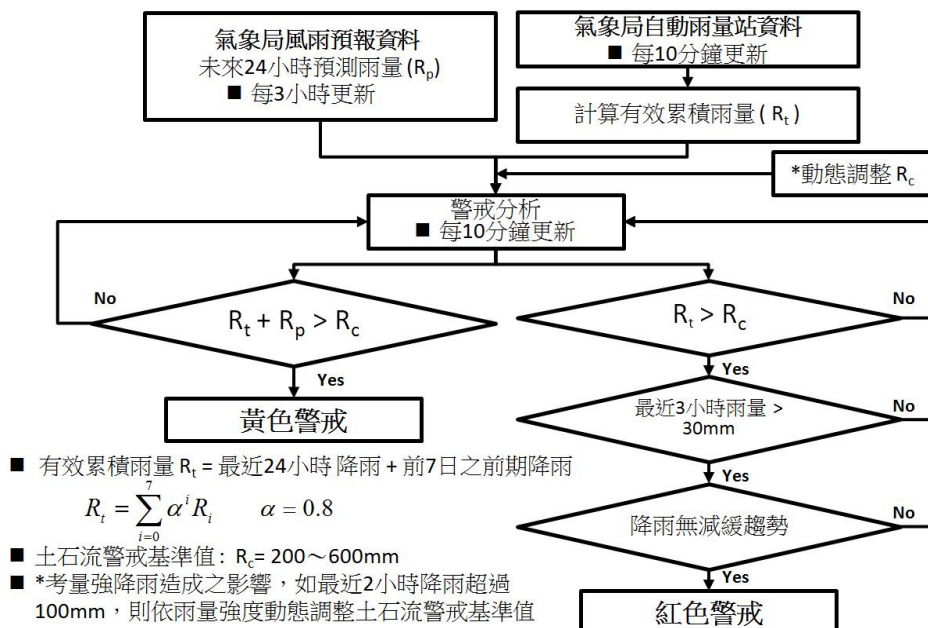


圖 5 台灣土石流警戒發布流程

Fig.5 The process of issuing warning for debris flow in Taiwan

繁發布後卻沒發生任何災害，造成執行疏散避難決策的地方政府及當地民眾對警戒機制失去信心。一個完整的土砂災害警戒系統，包含警戒模式及發布機制二部份。其中警戒模式之成效評估方式，本研究參酌日本目前採用的「捕捉率」及「空振率」(日本國土交通省國土技術政策總合研究所，2007)，並考量疏散所需時間(Lindell and Prater, 2007)及災害實際發生與預測位置之差異，建議使用命中率(Warning Hit Rate, WHR)、誤報率(False Alert Rate, FAR)、涵蓋率(Warning Cover Rate, WCR)及剩餘疏散時間(Remaining Time for Evacuation, RTE)等四項指標來檢視。命中率係評估警戒發布時間是否在災害發生之前，亦即為時間域之成效評估；誤報率則是檢視「假警報」(已發布警戒，但未發生任何災害)是否過於頻繁的依據，亦即地方政府及民眾對於警報信任度的指標；涵蓋率則是評估在同一場颱風豪雨事件中所發出的土砂災害警戒範圍，是否能涵括所有土砂災害所在的空間位置，亦即空間域之成效評估；而剩餘疏散時間則是指自警戒發布後至災害發生，可供民眾進行疏散避難的時間，亦即警戒有效性的指標。

為便於比較日本與台灣在土砂災害警戒模式的成效，本研究對於命中率及誤報率，採用與日本國土交通省國土技術政策總合研究所 2007 年訂定之「土砂災害警戒情報運用結果檢證手法(案)」內「捕捉率」及「空振率」一致之定義方式。其定義及計算方式如下：

(1) 土砂災害警戒命中率

(Warning Hit Rate, WHR) $WHR = DEAA/DE$

(2) 土砂災害警戒誤報率

(False alert rate, FAR) $FAR = WTND/WT$

其中 DE 為土砂災害總件數；DEAA 為土砂災害發生在警戒區內，且發生時間晚於或等於土砂災害警戒發布時間之土砂災害總件數；WT 為已發布土砂災害警戒的鄉鎮(市町村)總數；WTND 為已發布土砂災害警戒，但在該次颱風豪雨事件中，實際未發生土砂災害的鄉鎮(市町村)總數。

此外，因部份土砂災害可能發生在土砂災害警戒發布之範圍外，為了解其比例與已發布土砂災害警戒區內之警戒命中率，以及警戒發布後是否有足夠的通報及疏散時間，本研究另定義：

(3) 土砂災害警戒涵蓋率

(Warning Covering Rate, WCR) $WCR = DE/DEA$

(4) 警戒區內警戒命中率

(Warning Hit Rate in Warning Areas, WHRWA)

$WHRWA = DEAA/DEA$

※ 轉急文件 務請優先處理

行政院農業委員會土流災害緊急應變小組
土流警戒區預報

預報時間：100 年 08 月 30 日 20 時 報別：第 13 報

主旨：依據中央氣象局風雨資料研判：計 46 條土流潛勢溪流達紅色警戒，70 條土流潛勢溪流達黃色警戒(行政區域分布詳附表)，請依土流防災疏散避難作業規定執行警戒作為。

說明：

一、警戒作為：

(一) 黃色警戒：地方政府依災害防救法第二十四條，應進行疏散避難勸告。

(二) 莫拉克災區特定區域及安全堪虞地區建議進行預防性疏散避難。

(三) 紅色警戒：地方政府依災害防救法第二十四條，應勸告或強制其撤離，並作適當之安置。

二、土流警戒區範圍，請參考土流潛勢溪流圖冊及貴府建置之保全對象清單。

三、雨量資料，請逕上中央氣象局網站查詢(<http://www.cwb.gov.tw>)。

正本：宜蘭縣、基隆市、台北市、新北市、桃園縣、新竹縣、苗栗縣、台中市、南投縣、彰化縣、雲林縣、嘉義縣、台南市、高雄市、屏東縣、台東縣、花蓮縣災害應變中心

副本：詳附件。

土流災害緊急應變小組 <http://246.swcb.gov.tw>
電話：0800-246246 傳真：049-2394309
EMAIL: swcbfema@mail.swcb.gov.tw

下一報預報時間：100 年 08 月 30 日 23 時

預報時間：100 年 08 月 30 日 20 時 報別：第 13 報

南瑪都颱風已發布土石流警戒區明細

縣市	鄉鎮區	警戒區範圍		警戒區座落村里	
		警戒基準值 (毫米)	警戒 潛溪流 (條)	村里(條數)	小時
高雄 市	桃源區	200	5	復興里(1)、桃源里(2)、勤和里(2)	3
		200	7	建山里(2)、梅山里(1)、桃源里(1) 社寮里(3)	4
	六龜區	200	16	寶來里(3)、文武里(2)、大津里(3) 中興里(1)、興隆里(2)、新發里(5)	6
		200	2	中興里(2)	1
	茂林區	400	3	多納里(1)、茂林里(1)、萬山里(1)	3
		200	10	西安里(1)、關山里(3)、和安里(1) 大田里(2)、泰安里(3)	5
	甲仙區	200	4	小林里(3)、大田里(1)	2
		200	14	南沙里(2)、達卡努瓦里(6)、瑪雅里 (6)	3
	小計	5	61		27
	屏東 縣	獅子鄉	500	17	丹路村(4)、南世村(3)、內獅村(2) 獅子村(2)、竹坑村(3)、內文村(2) 草埔村(1)
400			2	霧台村(1)、阿禮村(1)	2
三地門 鄉		400	1	達來村(1)	1
		400	6	青雲村(1)、青山村(1)、安統村(1) 口社村(3)	4
瑪家鄉		400	1	瑪家村(1)	1
		400	5	光華村(1)、佳義村(4)	2
泰武鄉		550	1	平和村(1)	1
		550	3	萬安村(1)、佳平村(2)	2
來義鄉		350	6	來義村(1)、義林村(1)、古樓村(2) 文樂村(1)、望嘉村(1)	5
		350	3	丹林村(2)、文樂村(1)	2

圖 6 台灣土流警戒區預報單樣式

Fig.6 The format in which early-warning information is disseminated from SWCB

其中 DEA 為位於土砂害警戒區內的災害件數。圖 7 為前揭各項指標之定義及計算範例。

(5) 疏散剩餘時間

(Remaining time for evacuation, RTE)

自警戒發布至災害發生前之時間差，本研究定義為疏散剩餘時間 (Remaining time for evacuation, RTE)，依據前揭警戒命中率之定義， $RTE \geq 0$ 者即視為成功之警戒發布。但實務上，由於警戒發布後，自警戒訊息之傳遞至民眾完成疏散，須有一定準備時間，本研究定義為「疏散最短剩餘時間 (Shortest remaining time for evacuation, SRTE)」，亦即警戒發布的時間必須比災害發生時間提早至少一個 SRTE，才是有效的預警。不同地區依其交通狀況及人口屬性不同，其 SRTE 值並不一致。依據 Lindell and Prater (2007) 針美國德州及路易斯安那州有關颶風來襲民眾疏散的研究，民眾自決定避難到離開住家平均費時 3 小時 16 分。台灣也曾針對土石流潛勢區民眾疏散所需時間作過相關調查。白仁德 (2008) 針對山區弱勢族群調查，發現實際避難行為準備平均時間為 2 小時 40 分，疏散 90% 至少須 3 小時，完全疏散至少需 7 小時；林建元 (2007) 針對山區商業人口之調查指出，要達到 95% 以上的撤離率，需時 8 小時以上；吳杰穎 (2009) 針對南投縣水里鄉及新竹縣尖石鄉的民眾調查結果，其平均疏散時間分別為 2.62 小時及 3.83 小時；綜合以上結果，警戒發布後至災害發生時間，至少應預留 3 至 8 小時，似較為恰當。本研究建議取 SRTE 為 3 小時。

4. 土砂災害警戒發布機制評估方式

由於土砂災害警戒之發布機制多涉及國家之防災體系及政府組織運作，較不易有一致之定量評估標準，故本研究採用定性之比較方式進行探討。其項目包含警戒發布之單位、對象、型式、內容、發布頻率及傳達方式等。

5. 疏散避難率評估方式

依據日本及台灣的災害防救體系，疏散避難的決策及執行層級，在日本為市町村，在台灣則為鄉鎮市區公所，故本研究針對土砂災害警戒發布後之疏散避難率，係以鄉鎮為評估單元，其定義如下：

疏散避難率 (Evacuation Rate, ER) $ER = EWT/WT$

其中，EWT 為已發布土砂災害警戒之鄉鎮中，已執行避難勸告 (含強制撤離) 的鄉鎮數。

三、台日土砂災害警戒系統評估

1. 台日土砂災害警戒系統及疏散避難決策機制比較

台灣與日本之土砂災害警戒系統及疏散避難決策機制之比較如表 4。其重要差異說明如下：

- (1) 警戒模式：日本採用 RBFN 法定義臨界線 CL 較為客觀，毋需人工判定，且在無歷史災例地區，亦能直接以歷史雨量資料定出 CL。在警戒觀測指標方面，日本使用網格式雷達解析雨量資料，可提高雨量資料的空間解析度，以降低地面雨量站密度不足的問題。台灣目前雖亦有網格式雷達解析雨量資料 (即中央氣象局之 QPESUMS 系統)，惟限於雷達涵蓋率不足及地形遮蔽等問題，其精度於山區尚無法達到實用階段，故仍以自動雨量站之實測雨量作為警戒觀測指標。
- (2) 警戒發布機制：日本係由都道府縣針對其所轄市町村，採不定時方式發布警戒，並提供 5km 網格式度的土砂危險度等級資訊 (奈良縣已提供 1km 網格式度，<http://www1.nara-saboinfo.jp>)，可提供市町村了解那個區域土砂災害發生的機率較高。台灣係由中央政府 (水土保持局) 直接對縣市及鄉鎮發布警戒，發布的單元以村里為單位，並提供以 Google Maps 及 Google Earth 為底圖的

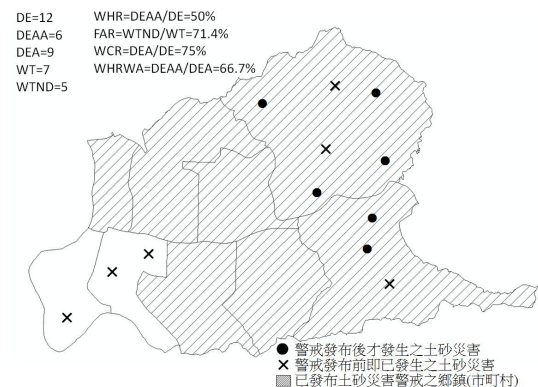


圖 7 土砂災害警戒模式成效評估指標範例

Fig.7 Example for the indexes of warning model's effectiveness

警戒發布圖，並採每日定時（5、11、17、20、23時）發布，必要時另予加報的方式發布警戒；此種定時發布機制對各級防災單位、媒體及一般民眾而言，較利於主動掌握最新警戒資訊，並降低新舊警戒資訊可能造成混淆之情形。

- (3) 疏散避難決策體制：日本之疏散避難決策及發布係由市町村執行，其避難指示依命令強度等級，由弱至強依序為「避難準備情報、避難勸告、避難指示」三級；台灣則是縣市及鄉鎮均可執行疏散避難決策，惟實務上，縣市仍多會尊重鄉鎮的意見。台灣原於土石災害避難指示上僅有「避難勸告、強制撤離」二級，但於2009年莫拉克颱風造成中南部山區重大災情後，另針對已劃定為「莫拉克颱風災區特定區域」或「安全堪虞地區」等高災害危險潛勢地區，採取預防性疏散避難，亦即於陸上颱風警報發布後，於尚無風雨之情況下，即先行撤離高災害危險潛勢地區民眾（行政院農業委員會，2010）。

2. 現行土石災害警戒模式成效評估

(1) 日本土石災害警戒發布成效評估

依據日本國土技術政策總合研究所之統計，平成20年（2008年）計發生土石災害669件，其中未在土石災害警戒範圍內，卻發生的土石災害計有192件（多為零星崩塌事件）。當年度歷次颱風豪雨事件，已發布土石災害警戒情報之市町村數目累計有1129個（如有某市町村在三場不同颱風豪雨事件中，均曾被發布土石災害警戒，則其數目應累計為3），其中有發生災害的市町村數有138個。在土石災害警戒區內發生的477件土石災害中，其發生時間在土石災害警戒情報發布之後者計有356件，故：

① 土石災害警戒命中率

$$WHR = DEAA / DE = 356 / 669 = 53.2\%$$

② 土石災害警戒誤報率 FAR=

$$WTND / WT = (1129 - 138) / 1129 = 87.8\%$$

表4 日本與台灣之土石災害警戒系統之疏散避難決策機制之比較

Table 4 Comparison with the warning system and evacuation decision between Japan and Taiwan

項目		日本	台灣	比較
警戒模式	定義CL方式	RBFN	RTI	RBFN方式較客觀，毋須人工判定；且使用歷史雨量紀錄直接定出CL，無災例地區亦可使用。
	警戒指標	60分鐘雨量、土壤雨量指數	有效累積雨量、最近3小時雨量	日本方式為雙指標並重，台灣方式以有效累積雨量為主，最近3小時雨量為輔
	使用雨量資料類型	1km網格式雷達解析雨量資料及未來1~6小時短期預報雨量資料	自動雨量站即時雨量資料（10分鐘更新）、颱風未來24小時預估雨量	使用網格式雷達解析雨量資料，可提高雨量分布的空間解析度，減少地面雨量站密度不足的問題
	CL檢討更新單位	都道府縣	中央政府（水土保持局）	-
警戒發布機制	警戒發布單位	都道府縣	中央政府（水土保持局）	-
	警戒發布對象	市町村	縣市政府、鄉鎮公所	-
	警戒發布條件	預測未來1~3小時蛇曲線將超過CL	有效累積雨量（mm）已超過土石流警戒基準值，同時最近3小時雨量已大於30mm，且後續仍有持續降雨趨勢	日本發布條件較為標準化，利於自動化；台灣之發布條件尚須較多人為經驗判斷
	警戒發布週期	不定時	每日5、11、17、20、23時定時發布，必要時另予加報	定時發布可使各級防災單位、媒體及民眾較能主動掌握最新訊息
	警戒發布等級	土石災害警戒情報（僅一等級，但5km網格式會另以4種顏色表示該網格式範圍內之土石災害風險，如圖3）	黃色警戒、紅色警戒（二等級）	以顏色作為警戒等級，較為直覺
	警戒發布單元	市町村	村里	-
	警戒傳達方式	電話、傳真、簡訊、網路	電話、傳真、簡訊、網路、土石流防災專員	-
	警戒發布格式	文字為主，圖形為輔	表格為主，文字為輔	-
	警戒範圍細部資料呈現方式	5km網格式危險度等級資料	Google Maps及Google Earth呈現	以5km網格式之危險度等級方式呈現，可顯示不同區域之危險等級差異性；以Google Maps方式呈現較直覺
	警戒適用範圍	土石流、崩塌	土石流	-
	疏散決策單位	市町村	縣市、鄉鎮	-
避難決策體制	疏散指示等級	避難準備情報、避難勸告、避難指示	危險區預防性疏散、避難勸告、強制撤離	-

③ 土砂災害警戒涵蓋率

$$WCR=DEA/DE=477/669=71.3\%$$

④ 警戒區內警戒命中率

$$WHRWA=DEAA/DEA=356/477=74.6\%$$

(2) 台灣土砂災害警戒發布成效評估

台灣目前之土砂災害警戒（土石流警戒區預報）之對象雖然只針對土石流災害，但為利於比較，以下統計仍納入所有之土砂災害。依據水土保持局 2009 年土石流年報之統計資料，2009 年水土保持局調查之重大土石災例計 127 件，扣除單純為淹水災害之事件後，土砂災害共有 117 件（113 件發生於莫拉克颱風），其中未在土石流警戒區範圍內，卻發生的土砂災害計有 26 件，其原因為該村里未曾劃定有土石流潛勢溪流，故並不在警戒機制監控的範圍內。當年度歷次颱風豪雨事件，已發布土石流警戒預報之鄉鎮數目累計有 72 個，其中有發生土砂災害的鄉鎮數有 30 個。在土砂災害警戒區內發生的 91 件土砂災害中，其發生時間在土砂災害警戒發布之後者計有 85 件，故：

① 土砂災害警戒命中率

$$WHR=DEAA/DE=85/117=72.6\%$$

② 土砂災害警戒誤報率

$$FAR=WTND/WT=(72-30)/72=58.3\%$$

③ 土砂災害警戒涵蓋率

$$WCR=DEA/DE=91/117=77.8\%$$

④ 警戒區內警戒命中率

$$WHRWA=DEAA/DEA=85/91=93.4\%$$

若以近五年（2007~2011 年）水土保持局土石流年報之資料統計，土砂災害警戒命中率平均為 45.4%，土砂災害警戒誤報率平均為 75.2%，土砂災害警戒涵蓋率平均為 62.6%，警戒區內警戒命中率平均為 72.6%，詳如表 5。

(3) 警戒誤報率對疏散率之影響

依據台日近年來之土砂災害警戒精度之統計結果可知，警戒之命中率約為 5 成，但誤報率卻高達 7 成 5 以上。以日本 2008 年為例，其誤報率高達 87.8%，亦即發布土砂災害警戒之市町村中，僅有 1 成左右會真正發生土砂災害。事實上，如此偏高的誤報率確實不利於市町村政府及一般民眾對土砂災害警戒情報之信任度（国土交通省河川局砂防部，2007；天野 篤、高山陶

子，2006）。依據調查，2008 年日本發布土砂災害警戒的地區，僅有 2.2% 的市町村政府有發布避難勸告，甚至其中超過 8 成是在已傳出災情後才發布；同時也僅有 2.8% 的地區，民眾曾依據土砂災害警戒情報進行自主避難（日本國土技術政策總合研究所，2010）。

相較於日本，台灣在土砂災害警戒發布地區之疏散率較高（如表 5），其原因在於中央災害應變中心每次颱風豪雨期間，均會強制要求地方政府必須落實於土石流警戒地區執行疏散之故。

3. 影響土砂災害警戒成效因素之探討

為探討實務操作面上可能影響土砂災害警戒成效的因素，本研究分析台灣近 5 年（2007~2011）統計資料，大致可看出幾項趨勢：

- (1) 災害規模（件數）的大小，與警戒命中率、誤報率及涵蓋率有相當程度的關連（如圖 8）。亦即現行以雨量為基礎的警戒模式，對於大規模災害有較佳之適用性，例如近年來災害規模最大的莫拉克颱風發生之 2009 年，全年土砂災害警戒命中率高達 72.6%，涵蓋率 77.8%，誤報率只有 58.3%；反之，如當年度較無大規模災情時，相關警戒精度表現則明顯較差。
- (2) 由於 2009 年莫拉克颱風造成的影響，地方政府對於警戒地區的疏散比例，有增加的趨勢（如圖 8），但是否會隨離受災經驗間隔愈久而降低，尚待持續觀察。

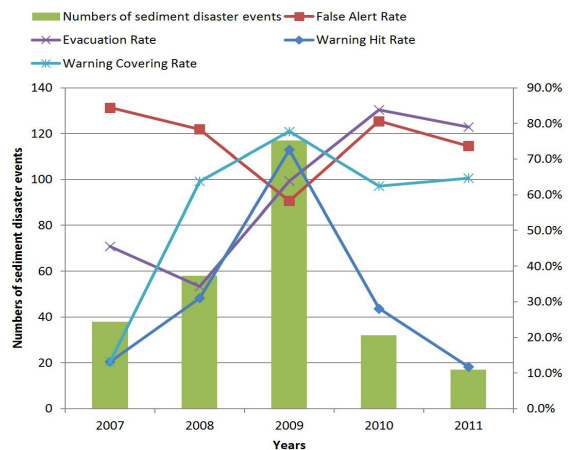


圖 8 台灣（2007~2011）歷年土砂災害件數及警戒成效

Fig.8 The numbers of sediment disaster events and warning effectiveness in Taiwan

- (3) 由於近年來中央政府強力要求已發布警戒的地區，地方政府務必執行疏散，反而對於負責發布警戒的水土保持局形成誤報率必須降低的壓力。由圖 8 可看出，誤報率近年似有呈現下降趨勢，但似乎也造成命中率有同時下降的傾向。以 2010 及 2011 年為例，警戒涵蓋率雖均有 6 成以上，但在降低誤報率的前提下，往往警戒發布決策過為謹慎，反而造成警戒發布後剩餘疏散時間不足，甚至警戒發布時間晚於災害發生時間，變成無效的警戒，形成涵蓋率提昇，但命中率反而大幅下降之不合理情形。
- (4) 由於台灣目前的土砂災害警戒發布之對象，僅包含土石流災害，故警戒只會針對已劃設有土石流潛勢溪流的鄉鎮及村里發布，因此如將崩塌、地滑等災害一併納入警戒精度的統計時，便會造成警戒涵蓋率偏低的現象。惟自 2008 年起水土保持局持續調查及增加土石流潛勢溪流的劃設，警戒涵蓋率已有增加之趨勢，亦即災害潛勢資料調查之完整性，對於警戒發布精度之提昇有一定程度的助益。統計資料亦顯示，台灣目前使用的警戒模式雖然僅針對土石流，但對於較大規模之崩

塌災害預測仍有一定的參考價值；惟未來如要真正應用於實際作業，須先完成崩塌潛勢區及其影響範圍的劃設。

- (5) 比較颱風及豪雨二種不同型態的災害事件，可發現二者之誤報率相近，但整體命中率相差 4 倍，涵蓋率相差 2.2 倍，警戒區內之命中率也相差 1.8 倍，如表 6。事實上，台灣現行土砂災害警戒模式，對於颱風及豪雨事件並無二致，其警戒成效表現相差甚鉅之主因在於颱風期間，中央氣象局會定時提供總雨量及未來 24 小時預測雨量資料，但豪雨事件時則否。而這些用以評估後續是否仍有降雨趨勢的重要資訊，係為水土保持局決策是否發布土石流警戒的重要環結之一（如圖 5）。亦即，預測雨量資訊之完整性，亦會影響土砂災害警戒精度。
- (6) 由表 6 之統計亦發現，颱風及豪雨事件中，土砂災害警戒區內地方政府執行疏散之比例亦相差 2.4 倍，其主要原因為多數豪雨事件時，中央災害應變中心並未成立，在中央未強力主導地方政府執行疏散作業時，疏散比例便明顯降低。

表 5 台灣及日本土砂災害警戒成效

Table 5 The sediment disaster Warning effectiveness in Japan and Taiwan

	已發警戒之鄉鎮數 (WT)	已發警戒，但未有災害之鄉鎮數 (WTND)	土砂災害警戒誤報率 (FAR=WTND/WT)	土砂災害總件數 (DE)	警戒區內災害件數 (DEA)	發生時間晚於警戒時間之災害件數 (DEAA)	土砂災害警戒命中率 (WHR=DEAA/DE)	土砂災害警戒涵蓋率 (WCR=DEA/DE)	警戒區內警戒命中率 (WHRWA=DEAA/DEA)	已發警戒且已執行疏散之鄉鎮數 (EWT)	避難勸告率 (ER=EWT/WT)
JAPAN (2008)	1129	991	87.8%	669	477	356	53.2%	71.3%	74.6%	25	2.2%
Taiwan (2009)	72	42	58.3%	117	91	85	72.6%	77.8%	93.4%	46	63.9%
Taiwan (Ave. in 2007~2011)	310	233	75.2%	262	164	119	45.4%	62.6%	72.6%	160	51.6%

表 6 台灣 2007~2011 年颱風及豪雨事件之土砂災害警戒精度比較

Table 6 The sediment disaster warning effectiveness during typhoon and heavy rainfall in Taiwan in 2007-2011

	已發警戒之鄉鎮數 (WT)	已發警戒，但未有災害之鄉鎮數 (WTND)	土砂災害警戒誤報率 (FAR=WTND/WT)	土砂災害總件數 (DE)	警戒區內災害件數 (DEA)	發生時間晚於警戒時間之災害件數 (DEAA)	土砂災害警戒命中率 (WHR=DEAA/DE)	土砂災害警戒涵蓋率 (WCR=DEA/DE)	警戒區內警戒命中率 (WHRWA=DEAA/DEA)	已發警戒且已執行疏散之鄉鎮數 (EWT)	避難勸告率 (ER=EWT/WT)
颱風	272	205	75.4%	223	152	114	51.1%	68.2%	75.0%	222	81.6%
豪雨	38	28	73.7%	39	12	5	12.8%	30.8%	41.7%	13	34.2%

由台灣近 5 年的警戒統計資料可看出，災害規模的大小、警戒發布人員的決策傾向、災害潛勢資料之完整性，以及預測雨量資訊完備與否，可能影響現行土砂災害警戒模式之預報成效。而欲提高警戒區內疏散的比例，上級機關的強力主導，可能是較有效的方式。

4. 警戒發布時機適當性之評估

(1) 災害發生時間分析

災害發生的時間會直接影響疏散之難易程度，依據山區的現況及民眾的作息時間，如災害發生時間為夜間 21 時以後至隔日 7 時以前，本研究定義為「不易疏散時段」(Difficult period of evacuation, DPE)。在此時段內，不論是警戒訊息的通報與傳達，或是要實際執行疏散避難工作，實務上將變得十分困難。依據台灣近 5 年 (2007~2011) 統計資料 (如圖 9)，土砂災害事件發生在不易疏散時間內的比例為 45.9%，如只統計颱風期間造成的土砂災害事件，其比例更高達 50%。如以有人員死亡失蹤之案例統計，發生於不易疏散時段內之比例更高達 52.2%。

(2) 警戒發布頻率評估

自 2002 年台灣水土保持局開始發布土石流警戒區預報起，一直比照日本採用不定時預報方式提供警戒訊息，亦即當雨量超過 CL 後即發布警戒。不定時預報方式雖然即時，但也陸續造成一些問題。例如夜間發布不利疏散執行、地方政

府及新聞媒體無法確認目前手上掌握的是否為最新的資訊、甚至警戒更新的速度超過電視跑馬燈更新的頻率或是警戒訊息向下傳遞的速度等等不合理現象。日本方面，天野 篤及高山陶子 (2006) 也曾針對類似的問題提出討論。為解決上述問題，水土保持局自 2009 年起，配合中央氣象局於颱風警報期間，每日 4、10、16、22 時發布之預估未來 24 小時及颱風總雨量預報，將土石流警戒區預報改為定時發布制 (每日 5、11、17、20、23 時)，必要時才會採取加報方式不定時更新警戒訊息。

(3) 疏散剩餘時間 (Remaining time for evacuation) 評估

依據台灣 2007~2011 年的資料統計，台灣土砂災害警戒發布後疏散剩餘時間 (RTE) 平均為 21.6 小時，日本 2008 年的資料統計平均為 4.4 小時，均已超過建議之疏散最短剩餘時間 SRTE (3 小時)。其差異主要在於日本採不定時發布，台灣為定時發布 (每日 5、11、17、20、23 時)，原則上除實際雨量已達警戒發布標準者外，如預估未來 3~6 小時內會達警戒發布標準者，亦會提前發布；且台灣之發布模式另考量夜間不易疏散時段 (DPE) 之問題，故於 17 時、20 時發布之土石流警戒區預報均會針對預估未來 12 小時內 (夜間) 有機會達警戒發布標準者，提前於此二時段發布紅色警戒。

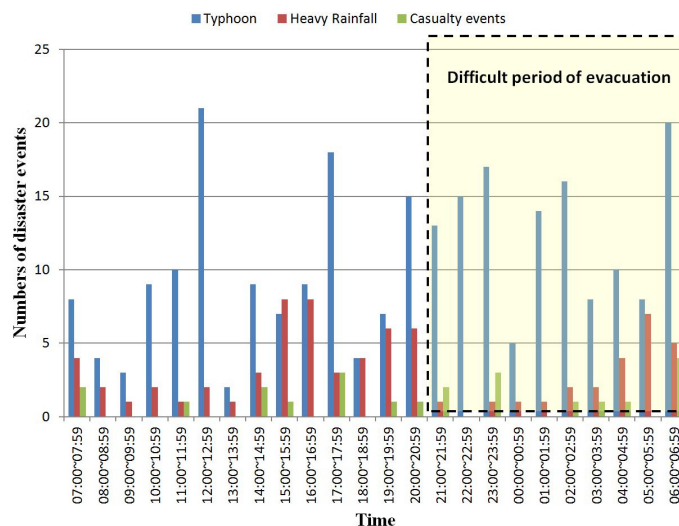


圖 9 台灣 (2007~2011) 土砂災害事件發生時段統計圖

Fig.9 The statistic of occurring time of sediment disaster events in Taiwan

由圖 10 可看出，台灣的警戒發布超過 5 成以上會提前於災害發生前 12 小時以上發布，亦即有較充份的時間可進行疏散避難，日本部份則是 5 成左右是在災害前 2 個小時內發布，相對而言，是否有足夠的時間進行通報及疏散，特別是在山區交通及通訊狀況不佳，且人口多老弱婦孺的情況下，值得探討。此外，目前日本採用的警戒命中率計算方式，並未考量警戒通報及疏散避難所需時間，似不甚合理，宜調整為剩餘疏散時間大於 1 個 SRTE 以上者方為有效之警戒。

四、以莫拉克颱風土砂災害警戒發布實例探討

1. 莫拉克颱風災情概況

2009 年莫拉克颱風係近年來造成台灣最大規模的天然災害，其降雨量具有以下特性：

- (1) 降雨延時長：自 8 月 6 日至 11 日，總降雨延時超過 100 小時。
- (2) 降雨強度高：最大時雨量超過 130mm/hr。
- (3) 累積雨量大：嘉義縣阿里山站累積雨量高達 2965mm。
- (4) 涵蓋範圍廣：台灣近 1/5 的地區其降雨量超過 1000mm 以上。

如此大範圍、高強度與巨量的降雨，造成台灣中南部及東南部地區大規模的水災及各類型坡地災害，死亡人數高達 699 人。此外，山區崩塌 59,490 公頃，

集水區崩塌率 5.52%，更甚於 1999 年集集大地震時的 4.70%(行政院莫拉克颱風災後重建推動委員會, 2010)。

2. 小林村災例說明

位於高雄縣甲仙鄉的小林村，是莫拉克颱風期間受災最嚴重的地區之一，在 24 小時內，接連遭受淹水、土石流、大規模深層崩塌、堰塞湖、堰塞湖潰決等多重複合型災害。其中 8 月 9 日上午 6 時發生於獻肚山的大規模深層崩塌更直接掩埋小林村 9~18 鄰聚落，造成 462 人死亡。

莫拉克颱風前，水土保持局設定小林村之土石流警戒基準值為 450mm，並依土石流警戒發布程序於 8 月 7 日 17 時發布土石流黃色警戒，7 日 23 時發布紅色警戒。8 日 15 時村內開始淹水，19 時 8 號橋遭土石流沖毀，至此，小林村 9-18 鄰聚落對外交通已完全中斷。9 日 6 時發生大規模深層崩塌埋幾乎完全埋沒小林村 9-18 鄰，包含過去幾年已有數次實際避難經驗的避難處所—小林國小。崩塌後的土石阻斷旗山溪，形成堰塞湖，並於 9 日 7 時潰決 (Chen et al., 2011)。

3. 現行雨量警戒模式於小林村災例之檢討

依據小林村災害發生之時間序列，自土石流紅色警戒發布至 8 號橋遭土石流沖毀，小林村形成孤島，期間長達 20 小時，足以進行警戒訊息通報及疏散避難工作，故台灣現行以雨量之警戒模式，確實已達成事前提供警戒訊息之功能。惟此案例最終仍造成 462 人死亡的重大災情，似乎顯示台日現行以雨量為基礎的警戒模式，仍有值得討論之不足處：

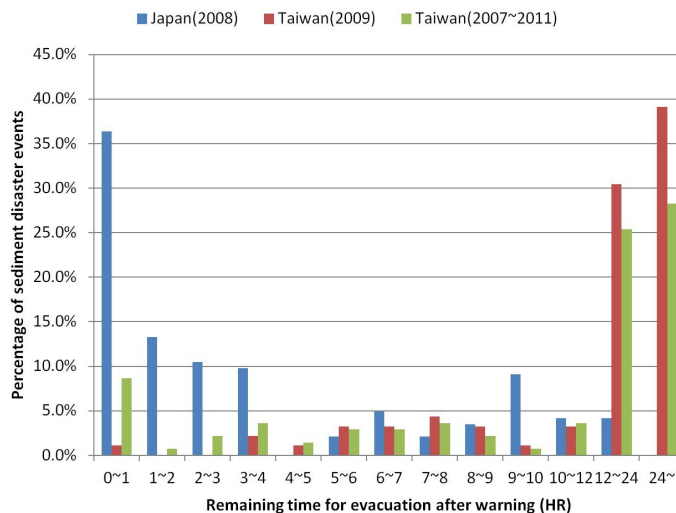


圖 10 台日土砂災害警戒發布後疏散剩餘時間分布圖

Fig.10 The remaining evacuation time after warning issued in Japan and Taiwan

- (1) 台日現行之警戒模式，只能提供降雨期間某個區域範圍內土砂災害發生的潛勢高低，無法明確指出那一處坡面或是那一處集水區致災機率較高，亦無法明確指出可能發生那一種類型的土砂災害，不利於地方政府執行疏散避難工作。
- (2) 台日現行警戒模式，係以雨量超過事前設定之 CL 作為警戒發布基準，但是對於雨量大小與災害規模之關係，並無法提供相關資訊。換言之，即使已預知雨量為 1000mm 或是 2000mm，現行警戒模式並無法模擬其差異及危害程度。
- (3) 依據莫拉克颱風的統計資料，約有 60.9% 的土砂災害發生於不易疏散的時段（晚上 21 時至隔日 7 時前，如圖 11），故警戒發布時機必須有入夜前提早發布之機制，且須預留足夠的疏散剩餘時間。
- (4) 土砂災害警戒模式只能提供災害發生之可能性，對於實際疏散避難之決策尚須考量其他問題，例如山區交通及通訊狀況、避難處所的位置與距離、危險區內民眾的行動能力與耐災能力等；惟較精確且能提供較長時間預測能力(例如未來 12 小時)的土砂災害警戒模式，將能有效提

昇地方政府疏散避難決策之能力，降低人命傷亡的可能性。

五、結 論

台日現行的雨量警戒模式，經過多年來的實證，確實對於土砂災害預警上具有一定功效，但因單純只採用雨量作為警戒發布之指標，在警戒之命中率、誤報率及涵蓋率上仍有不足；同時對於災害可能發生的明確地點、災害可能發生的類型，以及災害可能發生的規模亦無法有效掌握。

本研究已就警戒模式、警戒發布機制及避難決策體制上，分別比較台灣及日本土砂災害警戒系統上的異同之處。在警戒模式上，日本採用 RBFN 劃定 CL 之方式且有減少人工判斷及依賴災例資料的優點，且在雨量資料上，日本採用網格式雷達解析雨量資料，亦能提高雨量資料之空間解析度，降低雨量站密度不足的問題。在警戒發布機制上，台灣採用黃色及紅色作為警戒發布的等級，對於一般民眾較易理解；且台灣採用的定時預報機制，較能解決因資料更新頻率不同，造成新舊資訊混淆的問題。

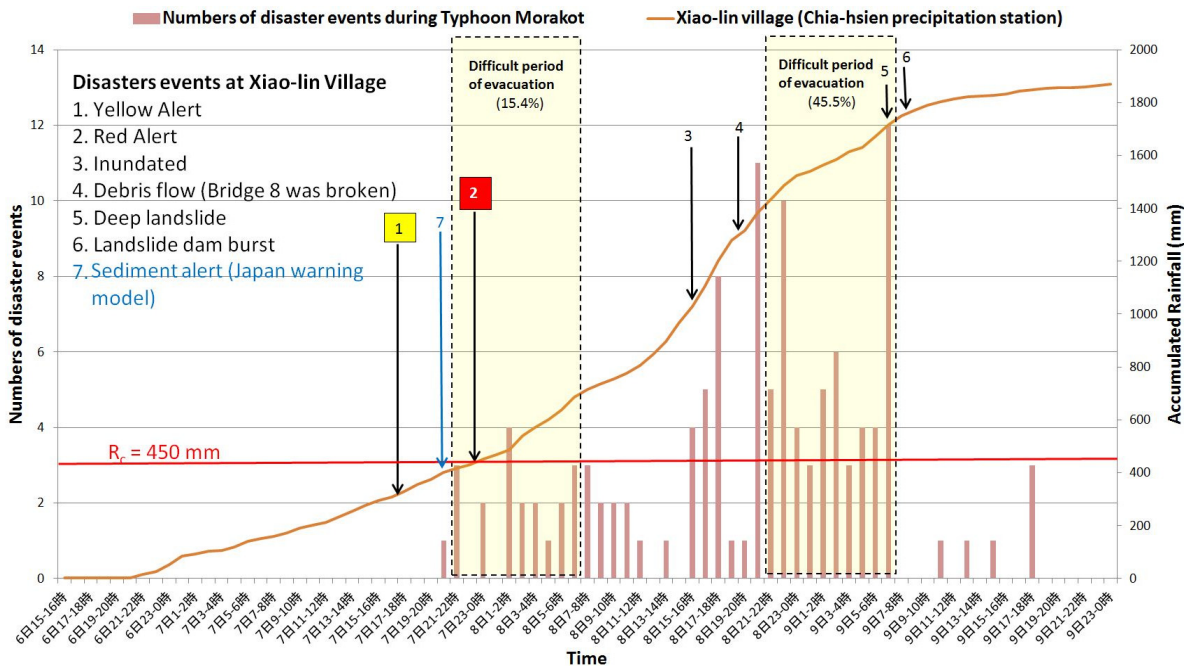


圖 11 莫拉克颱風期間重大土砂災害發生時段及小林村雨量及災害事件序列

Fig.11 The Accumulated rainfall and disaster events at Xiao-lin Village and the numbers of sediment disaster events during typhoon Morakot

本研究也由實務面上,分別考量時間域、空間域、信心度及有效度等相關面向,具體提出包含命中率、涵蓋率、誤報率及剩餘疏散時間等四項土砂災害警戒模式的成效評估指標,未來可作為警戒模式改進及檢討方向的評估依據。同時經由台灣近 5 年的警戒資料發現,災害規模、警戒發布人員的決策傾向、災害潛勢資料以及預測雨量資訊之完整性,均可能影響現行土砂災害警戒模式之成效。一般而言,災害規模愈大,命中率及涵蓋率均會提昇,誤報率亦會下降,而土砂災害潛勢圖劃設之完整性,亦會影響涵蓋率。研究數據也顯示,警戒發布人員企圖降低誤報率,而將警戒發布時機延後時,可能也會降低命中率。此外,由颱風及豪雨事件之警戒成效來看,氣象單位提供之預測雨量資訊,對於警戒發布之決策者而言,影響甚鉅。

對於提高土砂災害警戒區內之疏散比例方面,以台灣近年來的經驗可知,中央政府的強力主導可能是較有效而直接的方式。另一方面,由於警戒資訊之傳達與通報及疏散避難均需一定之時間,故警戒發布至災害發生前之剩餘疏散時間 (RTE) 亦為警戒成功與否的重要關鍵。依據日本 2008 年的統計資料,約有 5 成左右剩餘疏散時間不到 2 小時,對於交通、通訊條件較差,且人口多老弱的山區而言是否足夠,值得進一步探討。

由於現行的警戒模式僅單純使用空間的雨量分布作為警戒發布之指標,對於不同空間的地形、地質、地文及水文因子的差異並無法明確考量,以致無法提供較明確的災害發生地點、可能的災害類型以及災害規模。未來建議可在現有的警戒發布區域內,選擇以聚落為中心,將可能直接影響聚落的周邊坡面,以及聚落聯外重要的道路、橋樑、維生管線等脆弱點周邊的坡面作監測重點,並發展具地形、地質及水文因子的坡面指標作為下一階段的土砂災害警戒系統。亦即現有以雨量為基礎的警戒模式,可作為廣域的警戒機制;而結合地形、地質及水文因子的坡面指標則可發展為更細緻的坡面尺度警戒機制,以提昇警戒精度,降低人命傷亡。

參考文獻

- [1] 水土保持局 (2007-2011), 「土石流年報」。(Soil and Water Conservation Bureau (SWCB) (2007-2011). *Debris flow annual report*. (in Chinese))
- [2] 水土保持局土石流防災資訊網 <http://246.swcb.gov.tw> (Debris Flow Disaster Information Website, <http://246.swcb.gov.tw> (in Chinese))
- [3] 水土保持局 (2011), 「土石流災害預報與警戒作業手冊」。(Soil and Water Conservation Bureau (SWCB) (2011). *Manual of issuing debris-flow disasters alert*. (in Chinese))
- [4] 天野 篤、高山陶子 (2006), 「土砂災害と防災情報～台風 0514 号災害の避難に学ぶ～」, 日本地すべり学会誌, 43(6), 370-375。(Atsushi AMANO and Toko TAKAYAMA (2006). "On the situation of early warning information for sediment-related disasters ~Teachings of evacuation at T0514 disaster~." *Journal of the Japan Landslide Society*, 43(6), 370-375. (in Japanese))
- [5] 白仁德 (2008), 「大規模災害下避難決策需求與支援之研究—子計畫: 大規模災害下弱勢族群之避難疏散需求與資源運籌決策支援之研究—以颱風土石流災害為例 (II)」, 台灣行政院國家科學委員會。(Pai, J.T. (2008). *The study of the evacuation of the disadvantage groups under large-scale disaster*, National Science Council. (in Chinese))
- [6] 行政院農業委員會 (2010), 「土石流防災疏散避難作業規定」。(Council of Agriculture (2010). *Directions Governing the evacuation for debris flow disaster*. (in Chinese))
- [7] 行政院莫拉克颱風災後重建推動委員會 (2010), 「莫拉克颱風災滿半年重建成果報告」。(Morakot post-disaster reconstruction council, Executive Yuan (2010). *Report of post-disaster reconstruction in six months after Typhoon Morakot*. (in Chinese))
- [8] 国土交通省河川局砂防部 (2007), 「土砂災害警戒避難ガイドライン」。(Department of Erosion and Sediment Control (DESC) (2007). *Guidelines of warning system and evacuation*. (in Japanese))
- [9] 国土交通省河川局砂防部、氣象庁予報部、国土交通省国土技術政策総合研究所 (2005), 「国土交通省河川局砂防部と氣象庁予報部の連携による土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法(案)」。(Department of Erosion and Sediment Control (DESC), Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) and Japan Meteorological Agency (JMA) and National Institute for Land and

- Infrastructure Management (NILIM) (2005). *Manual for the method of setting mass-movement disasters warning criterion based on rainfall indices (Draft)*. (in Japanese))
- [10] 国土交通省河川局砂防部、気象庁予報部 (2005), 「都道府県と気象庁が共同して土砂災害警戒情報を作成・発表するための手引き」。(Department of Erosion and Sediment Control (DESC), Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) and Japan Meteorological Agency (JMA), (2005). *Guidelines for the method of issuing sediment disaster warning information to joint prefectures and Meteorological Agency*. (in Japanese))
- [11] 国土交通省河川局砂防部砂防計画課、国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター (2005), 「土砂災害ハザードマップ作成のための指針と解説 (案)」。(Department of Erosion and Sediment Control (DESC) and National Institute for Land and Infrastructure Management (NILIM) (2005). *Guidelines and commentary for sediment disasters Hazard Mapping*. (in Japanese))
- [12] 国土交通省国土技術政策総合研究所 (2001), 「土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法」。(National Institute for Land and Infrastructure Management (NILIM), (2001). *Manual of setting sediment disasters warning criterion based on rainfall indices*. (in Japanese))
- [13] 国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター 砂防研究室 (2007), 「土砂災害警戒情報運用結果検証手法 (案)」。(National Institute for Land and Infrastructure Management (NILIM) (2005). *Manual for the method of verifying sediment disasters warning (Draft)*. (in Japanese))
- [14] 国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター (2010), 「土砂災害の警戒避難等における技術的課題について」, 第 23 回 (平成 22 年度) 砂防研究報告会第 3 分科会。(National Institute for Land and Infrastructure Management (NILIM) (2010). "Studies of warning system and evacuation for sediment disaster." *23th Sabo research report*. (in Japanese))
- [15] 林建元 (2007), 「大規模災害下避難決策需求與支援之研究—以颱風土石流易發生地區為例—總計畫暨子計畫—大規模災害下商業人口之避難疏散決策需求與支援之研究 (I)」, 台灣行政院國家科學委員會。(Lin, C.Y. (2007). *The study of evacuation of commercial population under large-scale disaster*, National Science Council. (in Chinese))
- [16] 吳杰穎 (2009), 「不同土石流潛勢區居民疏散避難決策與行為之比較」, 坡地防災學報, 8(1), 1-14。(Wu, J.Y. (2009). "The Comparative Study of Residential Evacuation Decision and Behavior for the Vulnerable Debris Flow Areas." *Journal of Slope Land Hazard Prevention*, 8(1), 1-14. (in Chinese))
- [17] 陳振宇 (2008), 「國內土石流警戒發布機制沿革」, 台灣水土保持季刊, 63, 1-7。(Chen, C.Y. (2008). "The evolution of debris flow warning system in Taiwan." *Soil and Water Conservation Quarterly*, 63, 1-7. (in Chinese))
- [18] 陳亮全、馬士元 (2008), 「大規模災害下避難決策需求與支援之研究—以颱風土石流易發生地區為例—子計畫—大規模災害下政府避難疏散決策及執行過程之研究 (II)」, 行政院國家科學委員會。(Chen, L.C., and Mars, S.Y. (2008). *The study of evacuation decision of government under large-scale disaster*, National Science Council. (in Chinese))
- [19] 張保亮 (2011), 「QPESUMS 產品應用介紹」, 中央氣象局氣象衛星中心。(Chang, P.L. (2011). *Introduction of QPESUMS*, Central Weather Bureau (CWB). (in Chinese))
- [20] 詹錢登 (2000), 「土石流概論」, 科技圖書股份有限公司, 台灣, 136-137. (Jan, C.D. (2000). *Introduction of debris flow*, Scientific & Technical Publishing Co., Ltd., Taiwan, 136-137. (in Chinese))
- [21] 詹錢登、李明熹 (2004), 「土石流發生降雨警戒模式」, 中華水土保持學報, 35(3), 275-285。(Jan, C.D., and Li, M.H. (2004). "A Debris-Flow Rainfall-Based Warning Model." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 35(3), 275-285. (in Chinese))
- [22] Lindell, M. K., Lu, J.C., and Prater, C.S. (2005). Household Decision Making and Evacuation in Response to Hurricane Lili, *Natural Hazards Review*, Vol. 6, No. 4, 171-179.
- [23] Osanai, N., Shimizu, T., Kuramoto, K., Kojima, S., and Noro, T. (2010). "Japanese early-warning for debris flows and slope failures using rainfall indices with Radial Basis Function Network." *Landslides*, 7(3), 325-338.

- [24] Wieczorek, G.F., and Glade, T. (2005). Climatic factors influencing occurrence of debris flows. In: Jakob M, Hunger O (eds) *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*, Praxis, Springer Berlin Heidelberg, 325-362.
- [25] Chen, Y.S., Kuo, Y.S., Lai, W.C., Tsai, Y.J., Lee, S.P., Chen, K.T., and Shieh, C.L. (2011). "Reflection of typhoon Morakot - the challenge of compound disaster simulation." *Journal of mountain science*, 8(4), 571-581.

2012 年 05 月 30 日 收稿

2012 年 06 月 28 日 修正

2012 年 07 月 02 日 接受

(本文開放討論至 2013 年 9 月 30 日)